

Realisierung und Überprüfung eines 3D-Tastsystems für Mikro-Bauteile

Realization and Verification of a 3D-Probing System for Micro-Components

Thomas Liebrich*, Wolfgang Knapp, Konrad Wegener, IWF/ETH Zürich

* Korrespondenzautor: liebrich@iwf.mavt.ethz.ch

Zusammenfassung Es wird ein neues 3D-Tastsystem vorgestellt, dessen Design nicht nur bezüglich isotroper Steifigkeit am Tastelement, sondern auch bezüglich wirtschaftlicher Herstellung der einzelnen Bauteile und deren einfacher Montage optimiert ist. Eine Verlagerung des Tastelementes resultiert in einer Änderung der Position und/oder Orientierung einer beweglich gelagerten Messplatte, in welche der Taststift geschraubt wird. Die Bewegungen der beweglichen Messplatte werden mit kapazitiven Sensoren gemessen. Die Geometrie des Tastsystems wird unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet und mittels Kraft-Messungen überprüft. Damit steht ein verifiziertes Werkzeug zur Verfügung, mit welchem die Eigenschaften des Tastsystems, beispielsweise dessen Steifigkeiten, an vorgegebene Spezifikationen angepasst werden können. So werden verschiedene Varianten des Tastsystems vorgestellt, die für einen Einsatz auf (Mikro-) Koordinatenmessgeräten oder Werkzeugmaschinen angepasst sind. Die geometrische Überprüfung des Tastsystems umfasst die Bestimmung des Linearitätsfehlers in Antastrichtung, die maximale Antastabweichung, die Wiederholgenauigkeit sowie den Einfluss der Umgebungsbedingungen.

Summary A new 3D-probing system is presented, whose design is not only optimized for isotropic stiffnesses at the probing element but also for most effective manufacturing and easy assembling. A deflection of the probing element results in a change in the position and/or orientation of a moveable plate in which the probing stylus is screwed. The motions of the moveable plate are measured by capacitive sensors. The geometry of the probing system is designed using a procedure based on the Finite Element Method (FEM) and is verified by force measurements. Therewith the stiffnesses at the probing element can be determined using FEM simulations and adapted to given specifications before realizing the probing system. By means of this verified design tool it is possible to adjust the properties of the probing system like its stiffnesses to different measuring tasks and applications, e. g. as probing system for (micro-) coordinate measuring machines or machine tools. The geometric checking of the probing system includes the determination of the linearity error in probing direction, the maximum permissible probing error, the repeatability, and the environmental variation error.

Schlagwörter Messtechnik, Tastsystem, Entwicklung ▶▶▶ **Keywords** Metrology, sensor, development

1 Motivation

In immer mehr Produkten werden Mikro-Bauteile eingesetzt mit dem Ziel, mehr Funktionen in Produkten unterzubringen oder kleinere, leistungsfähigere und effizientere Produkte zu realisieren. Das Anwendungsgebiet von Mikro-Bauteilen ist äusserst vielseitig und betrifft beispielsweise die Unterhaltungs- und Kommunikationstechnik, den Medizinalbereich, das Transportwesen sowie die Energie- oder Militärtechnik [1;2]. Die geo-

metrische Prüfung von Mikro-Bauteilen mit taktilen Koordinatenmessgeräten (KMG) stellt neue Anforderungen an die Messtechnik: einerseits müssen die Tastsysteme auf geringe Antastkräfte ausgelegt sein, damit plastische Deformationen an der Werkstückoberfläche, verursacht durch die mechanische Antastung, vermieden werden; andererseits müssen die Messunsicherheiten der Tastsysteme reduziert werden, damit Mikro-Bauteile mit ihren kleinen Toleranzen, welche typischerweise

im sub-Mikrometerbereich liegen, auf Toleranzhaltigkeit überprüft werden können.

Wie in [3] dargestellt, sind bereits einige Tastsysteme speziell für Mikro-Bauteile entwickelt worden, welche Antastkräfte im Bereich von einigen mN oder sogar weniger bedingen. Einige dieser Systeme zeichnen sich durch Messunsicherheiten kleiner als $0,1\text{ }\mu\text{m}$ aus, sind jedoch aufgrund ihres kleinen Messbereiches von teilweise lediglich $10\text{ }\mu\text{m}$ sehr empfindlich in ihrer Handhabung. Zudem fehlt die Möglichkeit, den Taststift zu wechseln, beispielsweise nach einer Kollision. Die Fertigung und Montage ist meistens sehr komplex und aufwendig. Deshalb wird ein neues 3D-Tastsystem für Mikro-Bauteile vorgestellt, welches folgende Eigenschaften hat:

- Tastsystem in Voraus berechenbar bzw. auslegbar auf Soll-StEIFigkeit abhängig von der Messaufgabe, beispielsweise für Mikro-KMG, konventionelles KMG oder Werkzeugmaschine;
- Messbereich: $> \pm 100\text{ }\mu\text{m}$;
- Messunsicherheit: $< 1\text{ }\mu\text{m}$;
- Isotrope StEIFigkeit an der Tastkugel kleiner als $100\text{ }\frac{\text{N}}{\text{m}}$ zur Vermeidung plastischer Deformationen am Werkstück;
- Auswechselbarer Taststift;
- Einfache und kostengünstige Herstellung der einzelnen Komponenten aus Standardmaterial auf Werkzeugmaschinen zur Metallbearbeitung.

2 Aufbau und Auslegung des 3D-Tastsystems

2.1 Aufbau des Tastsystems

In Bild 1 ist der Aufbau des Tastsystems dargestellt. Der Taststift ist über ein Gewinde in die Messplatte geschraubt und somit im Falle einer Beschädigung auswechselbar bzw. kann an die jeweilige Messaufgabe angepasst werden (z.B. Taststiftlänge). Die Messplatte wird von Festkörpergelenken gehalten, welche wiederum mit zwei Spannrings in die Halterung des Tastsystems geklemmt werden. Die Messplatte besitzt drei zulässige Bewegungsrichtungen: die Z-Translation sowie die beiden Rotationen A und B (siehe Bild 1). Die anderen drei Bewegungsrichtungen in X- und Y-Richtung sowie die

Orientierung C werden durch die Festkörpergelenke gesperrt. Aus den drei zulässigen Bewegungsrichtungen Z, A und B der Messplatte wird die Verlagerung der Tastkugel in X-, Y- und Z-Richtung berechnet. Die Änderungen der Z-Lage sowie der Orientierungen A und B der Messplatte werden mit drei kapazitiven Sensoren erfasst, welche in der Halterung des Tastsystems geklemmt werden und rechtwinklig auf die Oberseite der Messplatte ausgerichtet sind [4; 5].

Das Tastsystem besitzt einen einfachen mechanischen Aufbau mit wechselbarem Taststift, zudem können die benötigten Komponenten auf konventionellen Werkzeugmaschinen für die Metallbearbeitung hergestellt werden.

2.2 Auslegung des Tastsystems

Für die Eigenschaften des Tastsystems sowie dessen Anwendung sind die StEIFigkeiten an der Tastkugel sowie der Messbereich entscheidend. Wie in [4] dargestellt, wird aufgrund der hohen StEIFigkeiten an der Messplatte in X-, Y- und C-Richtung sowie kleinen StEIFigkeiten in den zulässigen Bewegungsrichtungen der Messplatte in Z-, A- und B-Richtung eine sternförmige Geometrie der Festkörpergelenke verwendet. Die detaillierte Auslegung des Tastsystems basiert ebenfalls auf FEM-Berechnungen, so dass die Geometrie der Festkörpergelenke an die jeweiligen StEIFigkeitsvorgaben angepasst werden kann. Zudem ist es möglich, die StEIFigkeiten in allen drei Raumrichtungen einander anzupassen, so dass die StEIFigkeiten an der Tastkugel in X-, Y- und Z-Richtung isotrop werden.

Im Folgenden wird ein Tastsystem mit simulierten StEIFigkeiten an der Tastkugel von $84\text{ }\frac{\text{N}}{\text{m}} \pm 25\text{ }\frac{\text{N}}{\text{m}}$ (Unsicherheit der Simulation) präsentiert, welches sich dadurch für die Vermessung von sehr kleinen und sehr empfindlichen Bauteilen eignet, ohne deren Oberfläche zu beschädigen. Der Messbereich ist auf Tastkugelverlagerungen von $\pm 100\text{ }\mu\text{m}$ ausgelegt.

Damit die simulierten StEIFigkeiten an der Tastkugel in der Praxis erreicht werden, muss die Form der Festkörpergelenke mit jener der FEM-Berechnungen übereinstimmen. Durch den Einfluss der Gewichtskraft

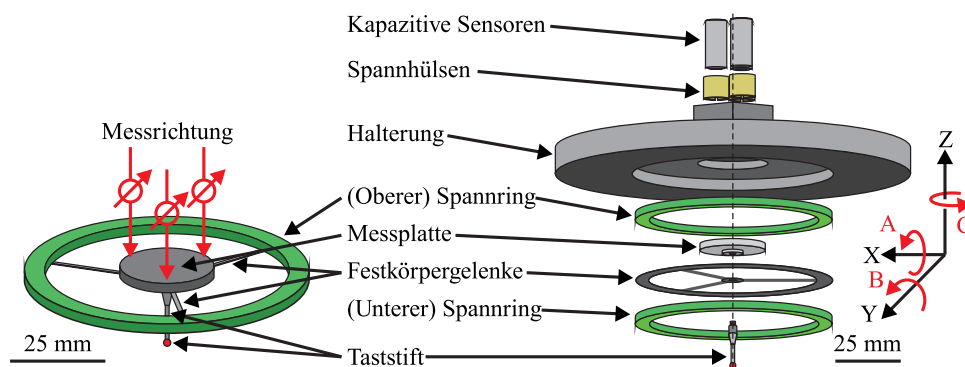


Bild 1 Schematischer Aufbau des 3D-Tastsystems für Mikro-Bauteile.

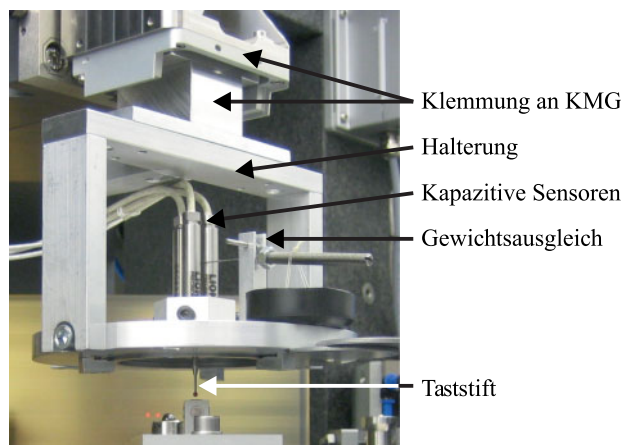


Bild 2 Realisierung des Tastsystems mit einem Gewichtsausgleich zur Kompensation der Durchbiegung der Festkörpergelenke aufgrund der Gravitation.

werden die Festkörpergelenke von ihrer neutralen Lage ausgelenkt, so dass die Steifigkeit im Betriebspunkt des Tastsystems in Z-Richtung etwa um Faktor 10 gegenüber der ideal ebenen Geometrie zunimmt. Deshalb wird ein Gewichtsausgleich realisiert (siehe Bild 2), der die Durchbiegung der Festkörpergelenke aufgrund der Gravitation kompensiert. Der Gewichtsausgleich basiert auf dem Prinzip einer Waage, wobei das Gegengewicht nicht nur justiert werden kann, sondern auch in Öl schwimmt um Schwingungen an der Tastkugel, verursacht durch das KMG, die Antastung oder Umgebungseinflüsse, zu dämpfen. Alternativ zu einem Gewichtsausgleich besteht auch die Möglichkeit, die Steifigkeiten des Tastsystems in X-, Y- und Z-Richtung ohne Gewichtsausgleich isotrop auszulegen. Dies resultiert jedoch in einem um mehr als viermal grösseren Aussendurchmesser der Festkörpergelenke (310 mm gegenüber 75 mm). Zudem sind die Steifigkeiten mit $156 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ deutlich grösser als jene eines Tastsystems mit Gewichtsausgleich ($84 \frac{\text{N}}{\text{m}}$) und kleinerem Aussendurchmesser der Festkörpergelenke (75 mm).

Einen grossen Einfluss auf die Steifigkeiten an der Tastkugel haben auch die Prozessparameter, mit welchen die Festkörpergelenke hergestellt werden. Beispielsweise verursachen nicht optimierte Prozessparameter während des Laserschneidens der Festkörpergelenke einen Grat auf den Gelenken, durch welchen die Steifigkeit in Z-Richtung um bis zu Faktor 3 erhöht wird [4; 6].

Die Festkörpergelenke werden aus Lehrenband 1.4310, welches sich hierfür aufgrund seiner tolerierten Blechdicke und guten Verfügbarkeit mit unterschiedlichen Dicken hervorragend eignet, mittels EDM ausgeschnitten.

2.3 Überprüfung der Steifigkeiten

Die mit Kraftmessungen experimentell überprüfte Steifigkeit beträgt $78 \frac{\text{N}}{\text{m}} \pm 26 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ in X- und Y-Richtung sowie $96 \frac{\text{N}}{\text{m}} \pm 28 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ in Z-Richtung. Wie in Bild 3 ersichtlich, verhalten sich die Steifigkeiten an der Tastkugel in der XY-Ebene isotrop. Im Rahmen der Unsicherheiten stim-

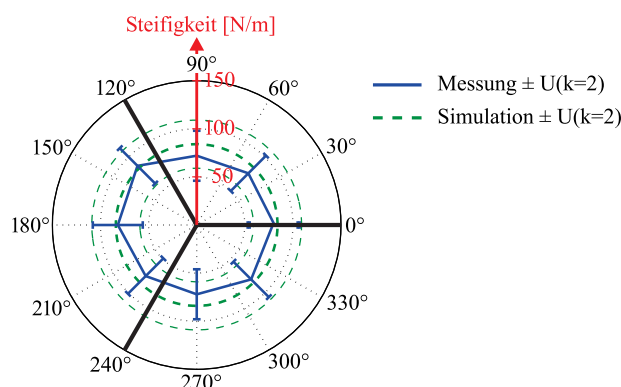


Bild 3 Ergebnisse der Steifigkeitsmessungen an der Tastkugel in der XY-Ebene (fett gezeichnete schwarze Linien: Orientierung der Festkörpergelenke).

Tabelle 1 Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Steifigkeiten an der Tastkugel.

Gemessene Richtung	Gemessene Steifigkeit $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$	Berechnete Steifigkeit $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$
X, Y ^(a)	78 ± 26	84 ± 25
Z ^(b)	96 ± 28	81 ± 20

^(a) Mittelwert der Messungen in der XY-Ebene, jeweils 45°. Jede Messung einmal wiederholt.

^(b) Mittelwert von drei Messungen in Z-Richtung.

men die simulierten mit den gemessenen Steifigkeiten überein (siehe Tabelle 1) und verhalten sich in allen drei Raumrichtungen isotrop.

3 Geometrische Prüfung des Tastsystems

Die geometrische Prüfung des Tastsystems erfolgt auf dem hochgenauen Koordinatenmessgerät ‚ISARA‘ von IBS Precision Engineering [7]. Die gemessene Linearitätsabweichung in Antastrichtung beträgt für eine Auslenkung der Tastkugel von 10 µm weniger als 0,12 µm bzw. 1,2%. Die maximale Antastabweichung (MPE_P gemäss [8]) über 541 Antastpunkte an einer Referenzkugel mit einer Formabweichung von lediglich 0,02 µm beträgt $0,68 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ Spanne über drei Messungen. In Bild 4 sind die gemessenen Abweichungen bezüglich der Referenzkugel dargestellt.

Die mittlere Wiederholgenauigkeit in den einzelnen Messpunkten über drei Wiederholungsmessungen an der Referenzkugel beträgt 0,01 µm, siehe Bild 5. Dabei wird der maximale Unterschied in den einzelnen Messpunkten für drei aufeinanderfolgende Messungen bestimmt und dieser über insgesamt 506 Messpunkte gemittelt. Der maximale Unterschied beträgt 0,25 µm und ist vermutlich auf Verschmutzungen wie Staub während der Messungen zurückzuführen, da es sich lediglich um einzelne Ausreisser handelt. Aufgrund der guten Wiederholgenauigkeit des Tastsystems in einzelnen Antastpunkten besteht die

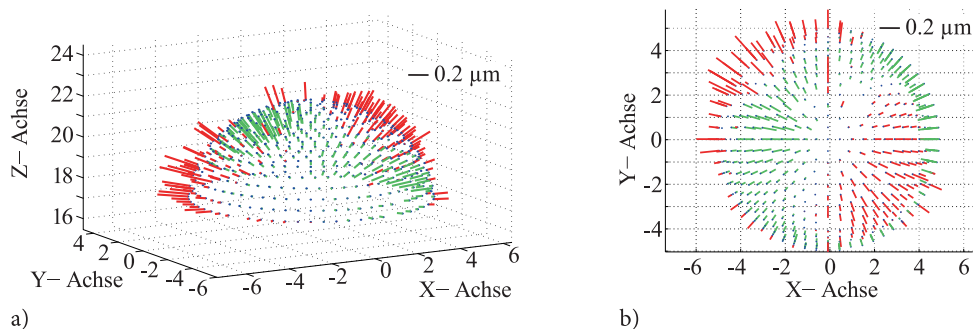


Bild 4 Überprüfung des 3D-Tastsystems auf einem hochgenauen Koordinatenmessgerät durch Messung einer bekannten Referenzkugel. Bild links: Räumliche Darstellung der gemessenen Abweichungen. Bild rechts: Darstellung der gemessenen Abweichungen in der XY-Ebene. Rot: von der Referenzkugel wegweisende Abweichungen. Grün: in die Referenzkugel hineinweisende Abweichungen.

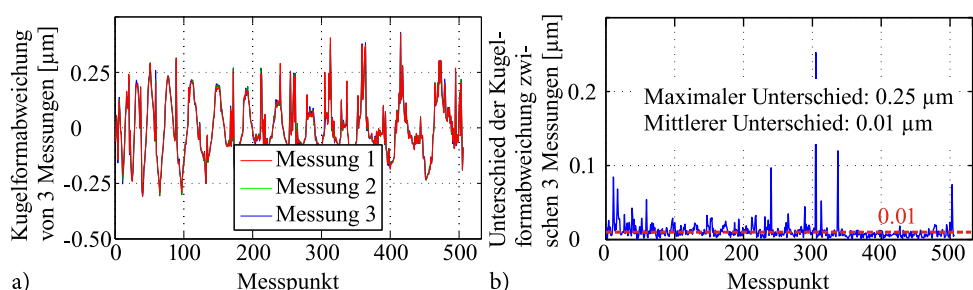


Bild 5 Überprüfung der Wiederholgenauigkeit in den einzelnen Messpunkten (insgesamt 506 Messpunkte). Bild links: Gemessene Formabweichungen an einer Referenzkugel für drei aufeinanderfolgende Messungen. Bild rechts: Maximaler Unterschied der gemessenen Formabweichungen zwischen den drei Messungen in den einzelnen Messpunkten.

Möglichkeit, die Antastabweichungen zu kompensieren und somit die MPE_P deutlich zu reduzieren.

Die Robustheit des Tastsystems gegenüber Kollisionen wird mit einer erzwungenen Kollision untersucht, bei welcher die Tastkugel um $400\text{ }\mu\text{m}$ ausgelenkt wird, so dass die Messplatte an allen drei Sensoren anliegt. Die Referenzkugel wird vor der erzwungenen Kollision vermessen und nach der Kollision. Die MPE_P vor der Kollision beträgt $0,60\text{ }\mu\text{m}$, nach der Kollision $0,55\text{ }\mu\text{m}$ und ist somit nicht wesentlich durch die Kollision beeinflusst. Die Wiederholgenauigkeit in den einzelnen Messpunkten beträgt mit der erzwungenen Kollision $0,02\text{ }\mu\text{m}$, ohne die erzwungene Kollision beträgt sie $0,01\text{ }\mu\text{m}$.

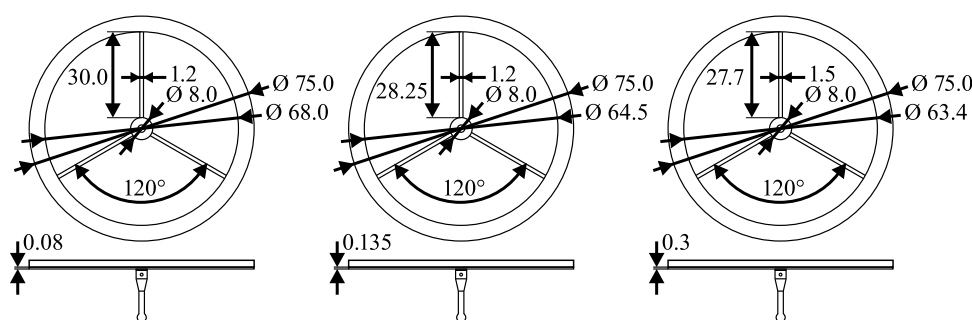
Der Einfluss der Umgebungsbedingungen (Environmental Variation Error gemäss [9]) wird in einem klimatisierten, vibrationsisolierten Reinraum der ISO-Klasse 7 überprüft [10]. Die Temperatur ist auf $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 0,25\text{ }^\circ\text{C}$ geregelt und ändert nicht mehr als $0,1\text{ }^\circ\text{C}$ pro Stunde. Dies sind sehr gute Umgebungsbedingungen für das KMG, um Mikro-Bauteile zu überprüfen. Während der Messung ist die Tastkugel mit einem Zerodur-Werkstück in Kontakt. Die grösste Verlagerung der Tastkugel von $0,54\text{ }\mu\text{m}$ tritt in Z-Richtung auf, welche mit der in der Nähe gemessenen Temperaturänderung von $0,31\text{ }^\circ\text{C}$ und den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Tasterhalterung korreliert [4]. Durch Verwendung eines anderen Materials für die Halterung des Tastsystems kann der Einfluss von Temperaturänderungen deutlich reduziert werden: entweder sollte Material mit minimaler

thermischer Ausdehnung verwendet werden wie beispielsweise Zerodur oder Invar, oder die Halterung (siehe Bild 2) sollte aus einem Material mit demselben thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie entsprechende Strukturteile des KMG sein.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ein 3D-Tastsystem für Mikro-Bauteile mit folgenden Eigenschaften wurde realisiert:

- Isotrope Steifigkeit an der Tastkugel: $84\text{ }\frac{\text{N}}{\text{mm}} \pm 25\text{ }\frac{\text{N}}{\text{mm}}$;
- Messbereich: $> \pm 100\text{ }\mu\text{m}$;
- Linearitätsfehler in Antastrichtung über $10\text{ }\mu\text{m}$ Tastkugelauslenkung: $< 0,12\text{ }\mu\text{m}$;
- Maximale Antastabweichung (MPE_P): $< 0,68\text{ }\mu\text{m}$;
- Mittlere Wiederholgenauigkeit (506 Messpunkte an Referenzkugel): $0,01\text{ }\mu\text{m}$;
- Mittlere Wiederholgenauigkeit nach erzwungener Kollision: $0,02\text{ }\mu\text{m}$;
- Auswechselbarer Taststift;
- Einfache, kostengünstige Herstellung der einzelnen Komponenten aus Standardmaterial sowie einfache Montage;
- Definierte Auslegung des Tastsystems basierend auf FEM-Berechnungen, so dass das Messprinzip an spezifische Anwendungen zwischen $18\text{ }\frac{\text{N}}{\text{mm}}$ und $1140\text{ }\frac{\text{N}}{\text{mm}}$ bei gleichen Aussenabmessungen angepasst werden kann, beispielsweise für (Mikro-) KMG oder Werkzeugmaschinen, siehe Bild 6.



Isotrope Steifigkeit an
Tastkugel: 18 N/m

Isotrope Steifigkeit an
Tastkugel: 84 N/m

Isotrope Steifigkeit an
Tastkugel: 1140 N/m

Bild 6 Verschiedene Geometrien der Festkörpergelenke zur Anpassung der Steifigkeiten an der Tastkugel an unterschiedliche Einsatzgebiete des Tastsystems.

Mittels einer Sensitivitätsanalyse, welche bereits für die Auswahl der verwendeten Sensoren und deren Anordnung eingesetzt wird, können der Einfluss der Sensoren und deren Anordnung auf die Messunsicherheit an der Tastkugel bestimmt werden.

Eine numerische Kompensation der Antastabweichungen (MPE_P) wird ermöglicht aufgrund der guten Wiederholgenauigkeit in den einzelnen Messpunkten von $0,01 \mu\text{m}$. Damit sollte die MPE_P von momentan $0,68 \mu\text{m}$ deutlich reduziert werden können, schätzungsweise auf die doppelte Wiederholgenauigkeit in den einzelnen Messpunkten, also auf $0,02 \mu\text{m}$.

Literatur

- [1] Masuzawa, T.: State of the Art of Micromachining. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 49/2, p. 473–488, 2000.
- [2] Dornfeld, D.; Min, S.; Takeuchi, Y.: Recent Advances in Mechanical Micromachining. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 55/2, p. 745–768, 2006.
- [3] Weckenmann, A.; Estler, T.; Peggs, G.; McMurtry, D.: Probing Systems in Dimensional Metrology. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 53/2, p. 657–684, 2004.
- [4] Liebrich, T.: 3D-Probing System for Micro-Components. Fortschritt-Berichte VDI, VDI-Verlag Düsseldorf, ISBN 978-3-18-521208-6, 2012.
- [5] Liebrich, T.; Knapp, W.: Improvements and experimental validation of a 3D-probing system for micro-components. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 61/1, p. 475–478, 2012.
- [6] Liebrich, T.; Knapp, W.: New concept of a 3D-probing system for micro-components. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 59/1, p. 513–516, 2010.
- [7] IBS Precision Engineering: ISARA 400. <http://www.ibspe.com>, 2011.
- [8] ISO 10360-1:2000 Geometrical Product Specifications (GPS)-Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 1: Vocabulary. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2000.
- [9] ISO 230-3:2007 Test code for machine tools – Part 3: Determination of thermal effects. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2007.

- [10] ISO 14644-1:1999 Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.

Manuskripteingang: 24. Januar 2013, zur Veröffentlichung angenommen: 24. Februar 2013



Dr. Thomas Liebrich ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (<http://www.iwf.mavt.ethz.ch>) der ETH Zürich.

Adresse: IWF/ETH Zürich, Tannenstrasse 3, CH-8092 Zürich, Schweiz, Tel.: +41 44 632 46 76, Fax: +41 44 632 11 25, E-Mail: liebrich@iwf.mavt.ethz.ch



Dr. Wolfgang Knapp ist Gruppenleiter Messtechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (<http://www.iwf.mavt.ethz.ch>) der ETH Zürich.

Adresse: IWF/ETH Zürich, Tannenstrasse 3, CH-8092 Zürich, Schweiz, Tel.: +41 44 632 46 662, Fax: +41 44 632 11 25, E-Mail: knapp@iwf.mavt.ethz.ch



Prof. Dr. Konrad Wegener ist Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigung (<http://www.iwf.mavt.ethz.ch>) der ETH Zürich.

Adresse: IWF/ETH Zürich, Tannenstrasse 3, CH-8092 Zürich, Schweiz, Tel.: +41 44 632 24 19, Fax: +41 44 632 11 25, E-Mail: wegener@iwf.mavt.ethz.ch